大功率半导体直接输出激光加工系统开发

胡晓冬[1,2],徐元飞[1,2],姚建华[1,2],于成松[1,2]

(1. 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江工业大学 浙江省重点实验室,
浙江 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 激光加工技术工程研究中心,浙江 杭州 310014)

摘 要:半导体激光器及其工业应用是激光领域研究与发展的热点,国内大功率半导体激光器的发展已经取得了较大进展,但基于国产大功率半导体直接输出激光器的自动化加工装备研究较少。研制了国产大功率半导体直接输出激光加工系统,开发了基于 DSP 的嵌入式激光加工过程检测与控制系统,设计了用于该系统闭环温度控制的模糊控制算法,并取得了良好的温度控制效果。基于该平台开展了激光宽带相变硬化实验,实验表明:在温度控制模式下,相变硬化层深度和硬度的一致性要优于恒定功率模式。

关键词:半导体激光器; 加工系统; 温度控制; 激光相变硬化

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)07-1996-06

Development of high power direct output semiconductor laser processing system

Hu Xiaodong[1,2], Xu Yuanfei[1,2], Yao Jianhua[1,2], Yu Chengsong[1,2]

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education, Hangzhou 310014, China;
2. Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Semiconductor lasers and their industrial applications are research focus in laser field, the development of domestic high power semiconductor lasers has made great progress, but the research on automated processing equipment based on domestic high power semiconductor direct output lasers is few. A laser processing equipment was developed which was based on domestic high power direct output semiconductor lasers. DSP-based embedded control system was also developed for laser processing measurement and control, and fuzzy control algorithm was designed for closed-loop temperature control, and a desirable temperature control effect was acheved. Wideband laser transformation hardening experiments on this platform show that, the consistency of depth and hardness of the transformation hardening layer are better in the temperature control mode contrast to that in the constant power mode.

Key words: semiconductor laser; processing system; temperature control; laser transformation hardening

收稿日期:2014-11-05; **修订日期**:2014-12-03

基金项目:国家自然科学基金(51271170);国家国际科技合作项目(2011DFR71030);浙江省科技厅公益项目(2013C31012);浙江省重大科技专项重点工业项目(2012C11001)

作者简介:胡晓冬(1975-),男,副教授,博士,主要从事激光加工技术领域方面的研究。Email:hooxoodoo@zjut.edu.cn

0 引 言

近年来，大功率半导体激光器的研究进展非常迅速，单条连续输出半导体激光器最大功率已经大于 600 W[1]，最高电光转换效率高达 72%[2-4]。德国 Laserline 公司所研制的 LDF 系列光纤耦合半导体激光系统，输出功率 1~15 kW，电光转换效率达 50%，所提供的高质量激光光束，适用于工程设备或零部件的修复和热处理。德国通快公司开发了DePosition Line 具有粉末输送器、粉末输送线和带有粉末喷嘴的加工镜组的激光熔覆专用系统，并集成了实时在线传感器系统以确保高质量的材料熔覆[5-7]。

我国大功率半导体激光器的应用和起步虽然较晚，但近年来也取得了巨大的进步。炬光科技研制的连续和准连续大功率激光器，其功率可达 5 000 W[8]；长春光学精密机械与物理研究所攻克千瓦级半导体激光器散热难题，开发了 6 700 W 激光迭阵模块，同时解决了垂直腔面发射激光器大面积二维集成面阵需大电流驱动的难题[9]。这些成果为国产大功率半导体激光加工装备的应用奠定了良好的基础，但是我国在大功率半导体激光器的集成加工装备的开发上还不够成熟，基于温度控制的工艺研究方面涉足较少。

文中针对国产大功率半导体直接输出激光器的加工工艺需要，开发了基于 DSP 的嵌入式控制系统，并将机器人运动系统、送粉系统、熔池温度检测与控制系统集成开发出了适用范围广泛的激光加工装备。基于该装备，探索了加工过程的闭环温度控制策略，开展了基于温度控制模式的大功率半导体直接输出激光加工工艺的基础研究。

1 系统平台组成与搭建

文中所开发的大功率半导体直接输出激光加工系统构架如图 1 所示，激光器采用是西安炬光科技有限公司的 2.5 kW 半导体直接输出激光器，光斑尺寸为 3×8 mm，波长为 980 nm；测温仪采用 IGAR 12-L 型非接触式双色测温仪，测温范围为 500~2 200 ℃；运动系统采用 STAUBLI 公司的 6 自由度 RX160 机器手；控制系统采用 Microchip 公司的 dsPIC 数字信号处理器开发了嵌入式控制器，进行加工过程的信息处理与温度控制；为实现机器手 IO 功能的拓展，以及机械手与嵌入式控制系统的通讯，选用德国 WAGO 公司的 750-881 型工业以太网控制器进行 IO 拓展与通讯。在上述构架基础上，文中开发的激光加工系统实物如图 2 所示。

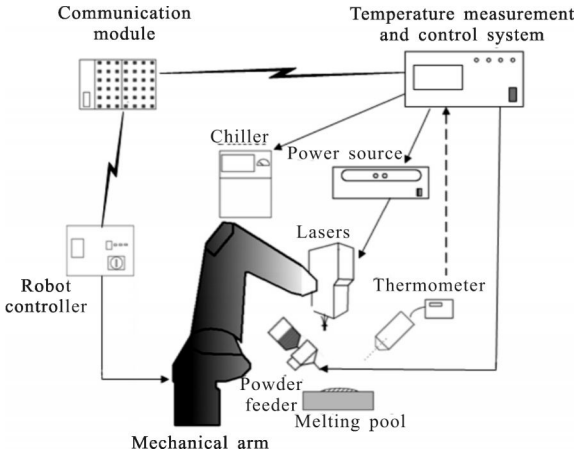


图 1 系统的整体硬件结构

Fig.1 Hardware structure of the system

图 2 系统平台实物图

Fig.2 Photograph of system platform

2 嵌入式控制系统开发

为实现半导体直接输出激光加工系统的人机交互及过程检测与控制功能，文中设计了基于 DSP 的嵌入式控制系统，并以实现加工过程的准确温度控制为目标，探索了基于模糊理论的温度控制方法。

2.1 嵌入式系统设计

文中开发的嵌入式控制系统采用 dsPIC 数字信号处理器为核心进行加工过程的信息处理与温度控制。其控制系统的结构如图 3 所示，硬件系统主要由 A/D 采样模块、人机交流界面接口、送粉模块以及 D/A 输出模块组成。该系统软件在 MPLAB IDE 集成开发环境下采用 CCS 编译器设计。软件主要由主程序和各子程序模块组成，主程序主要完成系统初始化，液晶屏显示，A/D 采样处理，键值处理、控制输

出等。子程序实现特定的模块功能,主要包括人机交流、数据的采集与滤波、控制算法、送粉器驱动、D/A 驱动等。

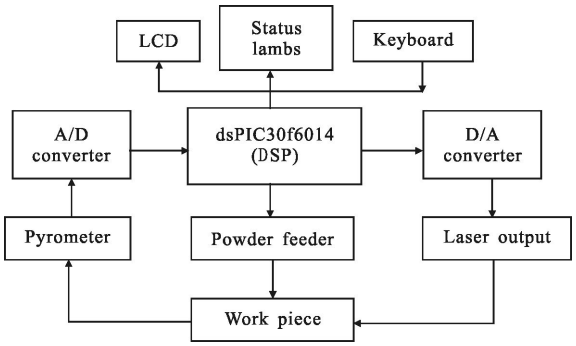


图 3 嵌入式控制系统结构图

Fig.3 Structure of embedded control system

2.2 基于模糊控制算法的激光加工温度控制

针对激光加工过程温度变化的非线性和时滞性特点,文中采用双输入、单输出结构的二维模糊控制模型进行温度控制,即输入变量分别为温度误差值 e 和温度误差变化率 ec,输出变量为激光器的功率 u。其闭环控制的原理框图如图 4 所示。

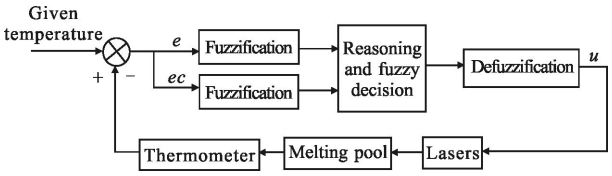


图 4 模糊控制系统原理框图

Fig.4 Schematics of fuzzy control system

控制模型的输入信号温度误差值 e、误差变化率 ec 的模糊变量 E、EC 划分为 7 个变量等级(PB, PM,PS,Z,NS,NM,NB),其模糊子集的论域为{-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4}。控制模型的输出为激光功率 u,其对应的模糊变量 U 的模糊子集论域为{-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5}。

采用偏大型柯西分布隶属函数将温度误差值 e 和误差变化率 ec 进行模糊化,根据激光加工实验中温度变化与控制的规律,建立基于实验经验的控制规则,并采用 Mamdani 模糊推理方法计算得出模糊关系矩阵 R,应用推理合成规则计算模糊输出 $U=(E\times EC)R$,得到的模糊规则查询表见表 1[10-11]。

表 1 模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control rules

	U	E								
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
	-4	-5	-4	-3	-2	-1	0	0	0	1
	-3	-4	-3	-3	-2	-1	0	0	1	1
	-2	-3	-3	-3	-2	0	1	1	1	2
	-1	-2	-2	-2	-2	0	1	1	2	3
EC	0	-2	-1	-1	-1	1	2	2	2	3
	1	-1	-1	-1	0	1	3	2	3	3
	2	-1	0	0	0	1	4	3	3	4
	3	0	0	0	1	2	4	3	4	4
	4	0	1	1	2	3	4	4	4	5

为评测该控制模型,文中以温度控制目标为 1 250℃在 45 钢基板上进行激光扫描实验,通过调节控制参数 e、ec 和 u 值,测试控制参数对温度控制的响应特性及稳定性的影响。图 5 为控制参数范围为:e=[-40,60],ec=[-2,2],u=[-15,15] 时的温度控制响应曲线,其峰值响应时间为 0.93 s,最大超调量 1.5%,稳态均方根误差 2.22 ℃。

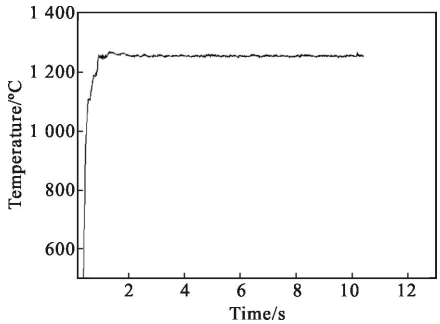


图 5 模糊控制温度响应曲线

Fig.5 Temperature response curve under fuzzy control

3 基于温度控制的激光相变硬化实验

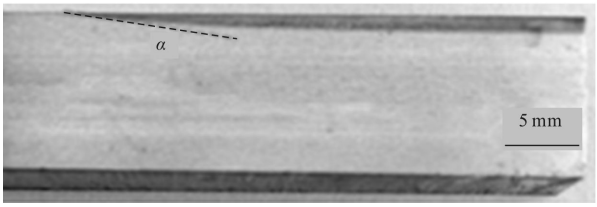
激光相变硬化是一种应用较广的激光加工工艺,激光辐照表面的温度和作用时间是影响相变硬化深度和硬度的直接物理参数。但目前在激光相变硬化应用中,调节激光输出功率仍是激光相变硬化工艺的主要参数指标[12],当零件尺寸形状、光斑规格等条件发生变化时,探索合适的激光加工功率是一件费时、费力的工作;并且在摸索出合适的功率范围后,加工过程中采用恒定的激光功率,也会因零件不

同位置散热差异性等因素造成实际硬化深度和硬度的不稳定。而在激光相变硬化工艺中采用温度控制的方法，有望简化工艺设定过程，稳定相变硬化质量。因此，文中在所开发的具有温度控制的大功率半导体直接输出激光加工系统进行激光相变硬化实验，比较温度控制条件下和恒激光功率条件下相变硬化层性能的差异性。

3.1 激光相变硬化实验

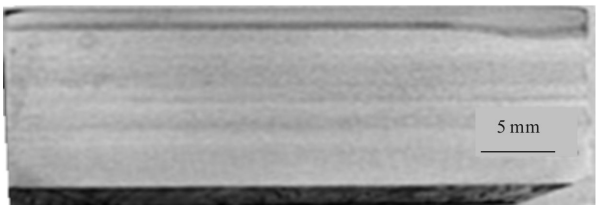
为比较温度控制条件下和恒激光功率条件下激光相变硬化层的稳定性、一致性，文中在10 mm×60 mm×100 mm 规格的 45 钢板上，采用 6×15 mm² 的矩形光斑和 2.5 mm/s 的扫描速度，加工出长度约 90 mm 的相变硬化带进行硬化层性能的对比测试；温度控制条件下的设定温度为 1 250 ℃，恒激光功率条件下的激光功率采用温度控制条件下的平均输出功率 1 250 W。

首先，比较了两种实验条件下硬化区纵剖面热影响区的宏观特征。图 6 为恒激光功率条件下试样纵剖面宏观照片，从图 6(a)可以看出，试样加工初始位置处热影响区外轮廓线的逼近角 α 角较小，热影响区深度达到稳定状态的用时比较长；从图 6(b)可以看出，在临近结尾的位置，热影响区的深度明显增加，而同时，在该位置表面出现微溶和过烧状态。图7(a)为温度控制条件下加工初始位置的热影响区特征，逼近角 α 角较大，热影响区深度很快达到稳定状态；而在图 7(b)中，在临近结尾的位置没有出现热影响区深度增大的现象，零件表面也没有出现微熔和烧损。



(a) 加工初始位置

(a) Start position of processing

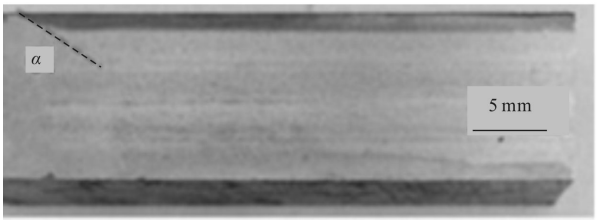


(b) 加工末尾位置

(b) End position of processing

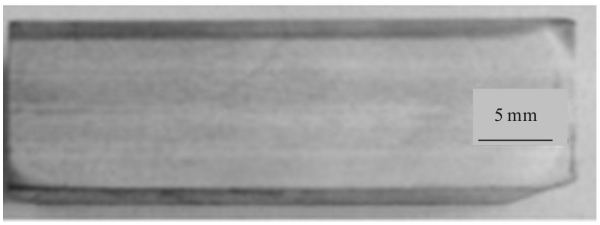
图 6 恒定功率模式下的热影响区范围

Fig.6 Heat affected zone in the constant power mode



(a) 加工初始位置

(a) Start position of processing



(b) 加工末尾位置

(b) End position of processing

图 7 温度控制模式下的热影响区范围

Fig.7 Heat affected zone in the temperature controlling mode

然后，比较了两种实验条件下硬化区纵剖面硬化层深度的变化规律。用显微硬度仪(型号为 HDX-1 000，加载载荷 200 g，加载时间 10 s)测量纵剖面上由表及里的显微硬度，进而运用插值法得到试样纵剖面上 450 HV 的硬化深度等高线，如图 8 所示。由图中可知，在恒激光功率条件下，初始加工位置的硬化层深度较浅，硬化曲线上升缓慢，在距离起点约 25 mm 处曲线才基本稳定；在临近结尾位置，硬化深度突然增加，硬化层深度均匀性较差。而在温度控制条件下，初始加工位置的硬化层深度上升迅速，在距起点约 5 mm 处就基本上达到稳定；在临近结尾位置，硬化层深度没有发生大的跃变。

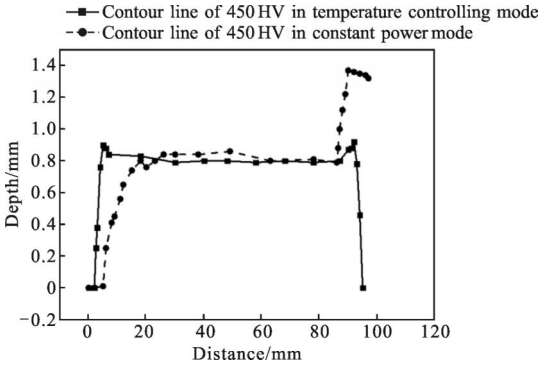


图 8 纵剖面上 450 HV 等高线

Fig.8 Contour line of 450 HV on longitudinal profile

3.2 实验现象分析

如前所述，激光相变硬化深度和硬度等指标与激光辐照表面的温度和作用时间等因素相关。图 9 为恒激光功率条件下和温度控制条件下加工表面温度变化曲线。图中曲线表明,在恒激光功率条件下,由于在加工的初始位置试样表面的温度低而且上升速率较慢，在激光器出光后14 s 才基本达到相对稳定的状态;在临近结尾位置,由于运动机构从 2.5 mm/s 的速度减速至停止的过程引起激光作用时间的增加,会造成表面温度的突然升高。而在温度控制条件下，激光器输出功率会根据测得表面温度与设定温度的差值进行动态的调整,因此,在整个加工过程中表面温度的稳定性较好。

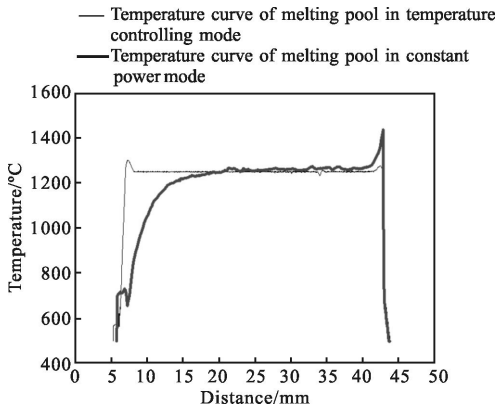


图 9 熔池温度变化曲线

Fig.9 Temperature curves of melting pool

相变硬化区的温度超调量会影响相变硬化的主要指标,上述两种实验条件下,相变硬化区的温度指标与相变硬化深度指标的关系如表 2。可以看出:在温度控制条件下,相变硬化区的温度最大超调量、稳态温度均方根误差、硬化深度最大超调量与稳态硬化深度均方根误差等指标均低于恒激光功率条件下的实验参数。

表 2 温度与硬化深度关系对照

Tab.2 Comparison of temperature and hardening depth in different modes

	Constant power	Constant temperature
Overshoot of temperature /℃	187.43	53.63
Overshoot of harding depth/mm	0.56	0.116
STD of temperature/℃	6.75	1.83
STD of harding depth/℃	0.04	0.018

4 结 论

文中针对激光加工的工业现场搭建了激光加工系统的硬件平台，设计了实时监测和调控激光加工温度的模糊控制策略，实现了对国产大功率半导体直接输出激光器的良好控制。尤其是该设备实现了激光加工过程中激光加工温度的稳定控制，提高了相变硬化层的质量。所初步探索的温度控制模式下宽带激光相变硬化工艺为温度控制模式下的激光加工工艺的进一步研究奠定了基础。

参考文献:

[1] Li H X, Chyr I, Jin X, et al. >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar [J]. ***Electronics Letters***, 2007, 43(1): 27-28.

[2] Kanskar M, Earles T, Goodnough T J, et al. 73%CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars [J]. ***Electronics Letters***, 2005, 41(5): 226-227.

[3] Knigge A, Erbert G, Jonsson J, et al. Passively cooled 940 nm laser bars with 73% wall-plug efficiency at 70 W and 25 ℃ [J]. ***Electronics Letters***, 2005, 41(5): 246-247.

[4] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. The research and status application of domestic high-power semiconductor laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(2): 189-190. (in Chinese)
马晓宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189-190.

[5] Zhu Hongbo, Zhang Jinsheng, Ma Jun, et al. 10 kW continuous output semiconductor laser cladding light [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2013, 21(4): 829-833. (in Chinese)
朱洪波, 张金胜, 马军, 等. 10 kW 连续输出半导体激光熔覆光源[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 829-833.

[6] Liu Guojun, Bu Baoxue, Qu Yi, et al. The development and research of high-power semiconductor laser technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(S): 4-5. (in Chinese)
刘国军, 簿报学, 曲轶, 等. 高功率半导体激光器技术发展与研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 4-5.

[7] Wu Yaoting, Liu Jichang, Liu Shibo, et al. The applications of semiconductor laser in remanufacturing industry[J]. ***Applied Laser***, 2013, 33(3): 333-336. (in Chinese)
伍耀庭, 刘继常, 刘石柏, 等. 半导体激光在再制造产业中

的应用[J]. 应用激光, 2013, 33(3): 333-336.

[8] Huang Xiaogang. Open domestic road of high-power semiconductor laser [J]. ***Laser and Optoelectronics Progress***, 2009: 68-70. (in Chinese)
黄小刚. 开启大功率半导体激光器国产化之路[J]. 激光与光电子学进展, 2009: 68-70.

[9] Zhang Zhaojun. Our high-power semiconductor lasers "punctured" foreign technical barriers [N]. Science and Technology Daily, 2012(3): 3-18. (in Chinese)
张兆辉. 我国大功率半导体激光器"刺破"国外技术壁垒[N]. 科技日报, 2012(3): 3-18.

[10] Ge Xincheng, Hu Yongxia. Overview of the status and development of fuzzy control [J]. ***Modern Defense Technology***, 2008, 36(3): 51-55. (in Chinese)
葛新成, 胡永霞. 模糊控制的现状与发展概述 [J]. 现代防御技术, 2008, 36(3): 51-55.

[11] Qin Xuping, Tan Guojun. The development application and prospects of fuzzy control theory [J]. ***Control Engineering***, 2005, 12(S): 137-139. (in Chinese)
秦绪平, 谭国俊. 模糊控制理论的发展应用与展望 [J]. 控制工程, 2005, 12(S): 137-139.

[12] Liang Erjun, Du Liping, Luo Jiangtao, et al. The band laser quenching studies of 45# steel[J]. ***Laser Magazine***, 2001, 22(2): 52-54.(in Chinese)
梁二军, 杜利平, 雒江涛, 等. 45# 钢宽带激光淬火研究[J]. 激光杂志, 2001, 22(2): 52-54.